

論文

[2059] 載荷レベルを変えた逆T形PC板埋設型枠合成床スラブの  
曲げ性状

岩原 昭次\*1・小森清司\*2・山下正吾\*3

1. はじめに

合成床スラブ等を対象としてコンクリートのクリープと乾燥収縮等の影響を調査する長期載荷実験研究の中で、比較的大きな初期たわみを与えて長期曲げ性状を考察する研究はあまり行われていないようである。しかしながら、一般的な長期曲げ性状の把握及びその解析手法の確立という面から、初期載荷時のたわみが比較的大きい場合も含めて、系統的な実験的検証を行うことは極めて重要である。

本研究は、以上の観点から、逆T形PC板埋設型枠を用いた両端固定一方向合成床スラブに対し住宅用積載荷重を基準にした3種類の載荷レベルを考え、この載荷レベルによる長期曲げ性状の相異を検討することを目的とする。なお、持続載荷期間は約30日迄としている。また、本研究の一部は既に報告している[1]。

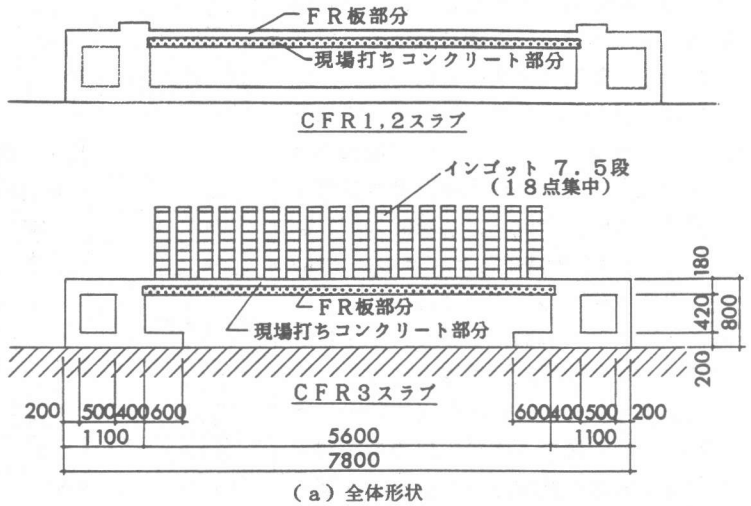
2. 実験概要

2.1 試験体と実験因子

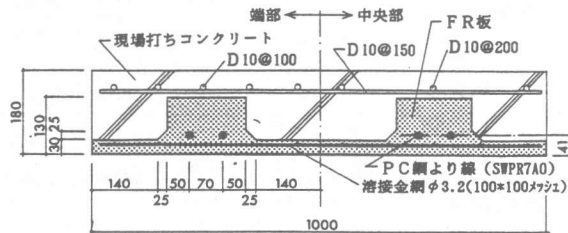
試験体はスラブ部分の長さが560cm、幅が100cm、スラブ寸が18cmの両端固定一方向合成床スラブである。この試験体の形状・断面寸法を図1に示す。試験体は、同図(b)の断面中に示す逆T字形並列の一方向プレストレストコンクリートプレキャスト板(以後、単にFR板と略す)を埋設型枠とし、その上に現場打ちコンクリートを打設して得る複合方式の床スラブである。試験体数は3体で、形状及び断面寸法は全て共通である。

実験因子は、表1に示すように、載荷レベルのみである。即ち、住宅用設計荷重の載荷レベルを基準にして、その約2倍、3倍の載荷レベルとする。この載荷レベルはスラブ端部で塑性ヒンジが生じると想定した荷重(=等分布積載荷重×スパン長)を基準にすると、CFR1,2,3スラ

ブ各々に対し約1.5割、3割、5割の載荷レベルとなる。各々の載荷レベルに合わせて試験体をCFR1スラブ、CFR2スラブ、CFR3スラブと名付ける。なお、CFR2スラブでは載荷時に持続載荷よりも若干大



(a) 全体形状



(b) 断面図

図1 試験体形状と載荷状態

\*1 熊本工業大学助教授、建築学科、 工博(正会員)  
\*2 長崎大学教授 工学部構造工学科、 工博(正会員)  
\*3 株式会社ピー・エス 建築事業部副長 (正会員)

きい載荷を加えて端部に強制的にひびわれを発生させた後、所定の持続載荷を行った。CFR1,2スラブは平成2年度に、CFR3スラブは平成4年度に実験を開始している。また、特にCFR3スラブはスタブ部分に梁型が出ていないことと、端部のひびわれ幅を測定するために、スラブの端部上面に最大幅5mm、深さ約14mmのV字形切欠きを設けている点がCFR1,2スラブと異なる。

なお使用材料の機械的性質を表2,3に示す。

## 2.2 試験体の養生と脱型

試験体は、3体共、現場打ちコンクリート打設後材令2日迄シートをかぶせてそのまま放置し、その後材令6日まで湿潤状態を保つ様にした。その後、試験体中央下の支柱以外の型枠を撤去した。材令7日以降は自然放置とした。なお、試験体は温度・湿度の影響を受ける。

## 2.3 載荷荷重及び載荷方法

各試験体の載荷荷重は次の通りである  
CFR1,3スラブではそれぞれ載荷荷重  $W_L = 0.24\text{tf/m}^2$ ,  $0.72\text{tf/m}^2$  (全荷重=自重+載荷荷重= $0.673\text{tf/m}^2$ ,  $1.156\text{tf/m}^2$ ) を負荷し、そのまま持続載荷させる。CFR2スラブでは載荷時に  $W_L = 0.53\text{tf/m}^2$  まで載荷してスラブ端部にひびわれを生じさせた後、事務所用設計荷重を対象にした載荷荷重  $W_L = 0.43\text{tf/m}^2$  (全荷重= $0.886\text{tf/m}^2$ ) まで下げて、以後持続載荷させる。実際の載荷はコンクリート製インゴットによって18点集中載荷を段階的に徐々に行った。持続時の載荷状態をCFR3スラブの場合で示すと、図1(a)のようになる。インゴットの重量は  $W_1 = 30\text{kgf}$ 、 $W_2 = 15\text{kgf}$  の2種類で、CFR1,3スラブでは載荷点1点当たり  $P = 2 \times W_1 + W_2$ ,  $7 \times W_1 + W_2$  であり、CFR2スラブでは最大載荷時の段階

で  $P = 5 \times W_1 + W_2$  を負荷した後、持続載荷として  $P = 4 \times W_1 + W_2$  を載荷した。

## 2.4 クリープ係数及び乾燥収縮歪測定用テストピース

表1 試験体因子

スラブ名	載荷レベル		ひびわれ
	載荷時	載荷後	
CFR1	住宅用設計荷重 ( $W=1.35\text{t}^2$ )		載荷時に無し
CFR2	端部にひびわれが発生する荷重 ( $2.2W$ )	事務所用設計荷重 ( $1.8W$ )	載荷時に強制的に発生させる
CFR3	3W		載荷時にひび割れ発生

(注) WはCFR1の載荷荷重(分布荷重の合計)

表2 コンクリートの機械的性質

スラブ	材令(日)	圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	ヤング係数 ( $10^5\text{kg/cm}^2$ )	割裂強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )	最大歪 (%)	スラブ (cm)
CFR1,2	F R板	7	509	2.95	43.6	2
	現	53	536	3.42	42.3	
	現	28	200	2.46	20.3	0.236
CFR3	F R板	7	502	2.86	41.6	2
	現	56	568	3.03	43.7*	
	現	28	238	2.04	24.7**	0.218

(注1) 表中の値は試験体と同一養生の下で作成したテストピースによる結果  
(注2) \*印は材令102日の値、\*\*印は材令74日の値  
(注3) F R板：F R板用コンクリート 現：現場打ち用コンクリート

表3 鋼材の機械的性質

種別	P C鋼より線(注1)		異形鉄筋	
品質	SWPR-7A $\phi 12.4\text{mm}$		D10(SD295A)	
対象	CFR1,2	CFR3	CFR1,2	CFR3
標準直径(mm)	12.4		9.54	
公称断面積( $\text{cm}^2$ )	0.929		0.71(0.619)	0.71(0.660)
降伏点応力( $\text{kg/cm}^2$ )	17707	17355	3820	4025
ヤング係数( $\text{kg/cm}^2$ )	$2.07 \times 10^6$	$1.95 \times 10^6$	$1.92 \times 10^6$	$1.91 \times 10^6$
最大強度( $\text{kg/cm}^2$ )	18622	18563	5559	5793
降伏点歪(%)	0.2	0.2	0.200	0.214

(注1) ミルシートによる

(注2) ( )内は実断面積

表4 クリープ係数と乾燥収縮歪測定用テストピース

名称	対象	コンクリートの種類	環境条件	寸法(cm)	載荷時材令	載荷レベル(計画)			
クリープ係数用	CFD	CFR1,2	試験体と同一	$\phi 10 \times 20$	68日	$F_{c1}/3$			
	CND	スラブ			現場打ちコンクリート	43日	$F_{c2}/3$		
	CF3D	CFR3	試験体と同一		$\phi 15 \times 30$	57日	$F_{c1}/3$		
	CN3D					現場打ちコンクリート	29日	$F_{c2}/3$	
	CN3S		スラブ			恒温・恒湿 ( $20^\circ\text{C}, 60\%$ )			
乾燥収縮用	SF	CFR1,2	試験体と同一	$\phi 10 \times 20$		-	-		
	SN	スラブ						現場打ちコンクリート	
	SF3	CFR3	試験体と同一		$\phi 15 \times 30$			-	-
	SN3								
	SN3S		スラブ						

(注)  $F_{c1}$ ,  $F_{c2}$ はそれぞれF R板、現場打ちコンクリートの圧縮強度

クリープ係数及び乾燥収縮歪測定用テストピースの一覧を表4に示す。

### 2.5 測定方法

中央点の変位はスラブ下中央に設置した電動式変位計で、PC鋼より線に対してはスラブ中央部位置に、また、現場打ちコンクリート中の鉄筋 (D10)は図2に示す位置に歪ゲージ(FEL-1L, TML製)を貼付け測定した。テストピースによるクリープ歪と乾燥収縮歪に対してはテストピース中央に埋込み型歪ゲージ (KM100B, TML製)を埋込み測定した。

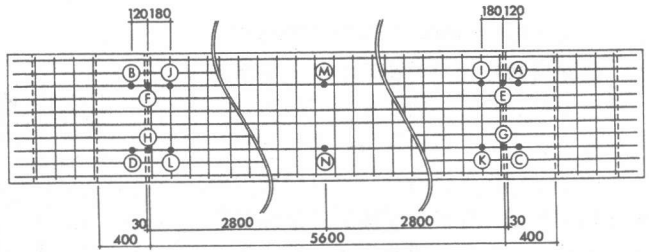


図2 鉄筋歪ゲージ位置

### 3. 実験結果

#### 3.1 乾燥収縮歪

図3にテストピースによる乾燥収縮歪を示す。横軸は現場打ちコンクリート打設日 (材令0日)と荷重実験日を基準にした経過日数の2種類で示してある。荷重実験日を基準にした経過日数42日までの乾燥収縮量はSFで  $0.31 \times 10^{-4}$ 、SF3で  $0.83 \times 10^{-4}$ であり、両者とも極めて小さいが、一方、同じくSNとSN3に対しては前者で  $2.35 \times 10^{-4}$ 、後者で  $2.36 \times 10^{-4}$ でほぼ一致している。このことから、FR板では荷重時を基準にした乾燥収縮歪は殆ど無視することができ、また、CFR3スラブの現場打ちコンクリートの乾燥収縮歪の経時変化はCFR1,2スラブの現場打ちコンクリートに対しても適用できることが分かる。

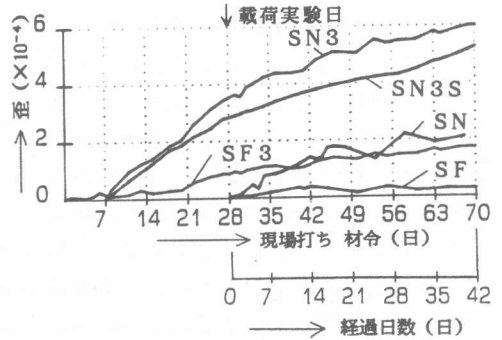


図3 乾燥収縮歪の経時変化

#### 3.2 クリープ係数

図4にクリープ係数を示す。現場打ちコンクリートのクリープ係数は経過日数42日でCN3Dでは2.11、CNDでは1.87を示しており、前者は後者の約1.13倍となった。現場打ちコンクリートに対してはクリープ実験開始日がCN3Dで材令29日、CNDで材令43日であるが、この14日程度の荷荷日の違いはクリープ係数に顕著な差異を現すまでに至っていない。自然な環境条件の下に置かれたCN3Dと恒温・恒湿室に置かれたCN3Sとではクリープ係数に明確な差異が認められ、経過日数42日でCN3Dのクリープ係数はSN3Sの約1.27倍となっている。

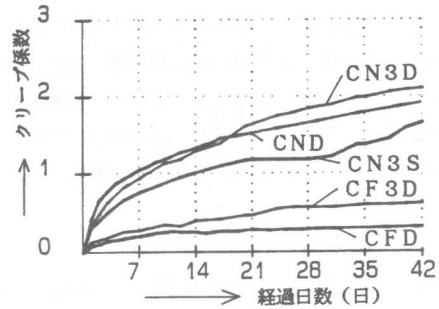


図4 クリープ係数

また、現場打ちコンクリートとFR板コンクリートとでは、前者は1週間湿潤養生された普通コンクリート、後者は14時間蒸気養生された早強コンクリートであ

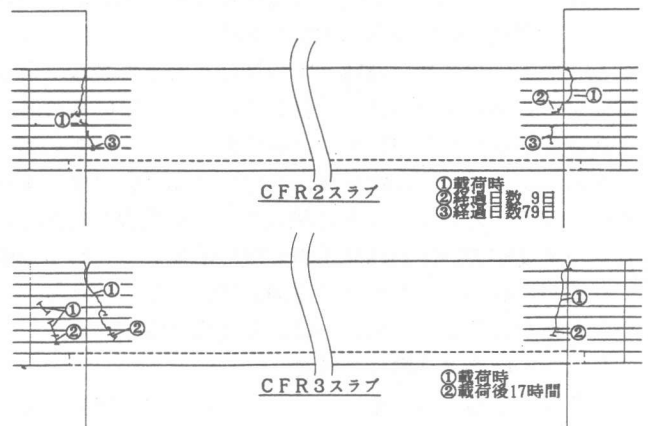


図5 ひびわれ図

り、両者の特性の違いが顕著に現れている。経過日数42日で前者のクリープ係数は後者の約3.4~5.8倍となっている。したがって、このような現場打ちコンクリート部分とFR板部分のクリープ係数の顕著な相違がこの種の合成床板の長期変形性状の解析を著しく複雑にさせているといえる。

### 3.3 ひびわれ状態

図5にひびわれ状態を示す。CFR1スラブは荷重によってはひびわれを生じなかったが、CFR2スラブではコンクリート製インゴット第4段荷重(荷重荷重 $0.386\text{tf/m}^2$ )直後にスラブ両端部に僅かなひびわれを生じた。CFR3スラブでは両端部にV字形切欠きを入れてあるために、第2.5段荷重(荷重荷重 $1.35\text{tf}$ )後の比較的早い段階でひびわれが切欠き底部に生じた。その後、CFR2,3スラブとも荷重の増大に伴ってその生じたひびわれが進展するだけで、新たな位置にはひびわれは生じていない。荷重終了時には端部のスラブ丈の中間位まで進展した。一方、経時的にはCFR1スラブでは経過日数9日の時点でスラブ両端部にひびわれを生じているのを発見した。CFR2,3スラブでは経時的にも新たなひびわれは発生しておらず、ひびわれ幅とひびわれ深さのみが進展しているだけで、いずれもスラブ下部分のFR板フランジ上面近傍までで、貫通はしていない。

### 3.4 中央点たわみ

たわみの測定はスパン中央部スラブ直下の支柱の撤去時、インゴット載荷時の順で行った。図6に経過日数42日までの経時変化を示す。横軸は載荷段階(支柱撤去時の作用荷重は不明であるので、便宜上、スラブ自重で表し、この自重と載荷荷重の和で表示)、載荷終了後から経過日数1日迄を時刻(分あるいは時間)で、1日以後を経過日数の3区間で表示している。このようなグラフの表し方はPC鋼より線歪と鉄筋歪共に同様である。

支柱撤去後の主な経時時点での経時たわみを表5に示す。経過日数40日でCFR1スラブのたわみ増加率が他の試験体よりも約1.6倍強大くなっているのは、3.3で述べたように経過日数9日でスラブ両端部に生じたひびわれによる影響と考えられる。また、CFR2で経過日数1日におけるたわみ増加率が0.12と他の2つの試験体に比較して小さいのは、スラブ端部に強制的にひびわれを発生させるために5.5段までインゴット載荷したことが原因と考えられる。したがって、経過日数1日のたわみ増加率は載荷時のひびわれ発生の有無に関係なく、約0.2倍強と推定される。CFR2とCFR3スラブについて経過日数40日でのたわみの増加率は近似し、したがって、本研究での載荷レベルの範囲では経時的には大きな相違を示さないものと考えられる。

### 3.5 PC鋼より線の経時歪

図7に支柱撤去前を基準にしたPC鋼より線の経時歪(経過日数39日)を示す。PC鋼より線はプレテンション方式で緊張力が導入されており、その1本当たりの平均の初期緊張力は歪測定値の結果から、CFR1,2スラブで $10.25\text{tf/1本}$ 、CFR3スラブで $9.09\text{tf/1本}$ である。導入以後のPC鋼より線歪は載荷実験

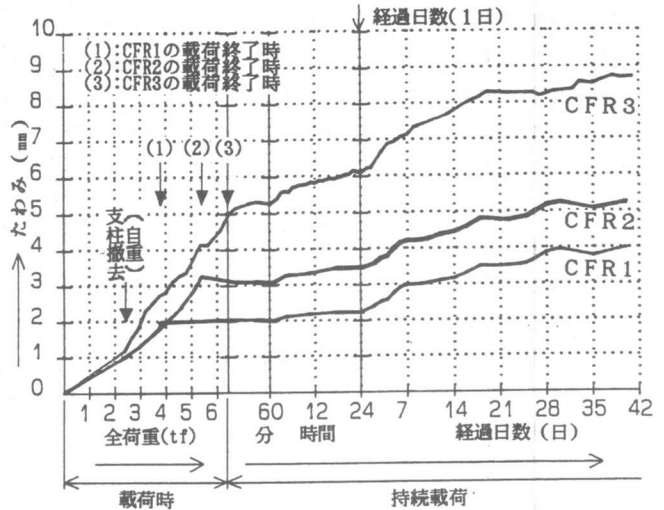


図6 経時たわみ

表5 主な時点での経時たわみ(mm)

スラブ名	支柱撤去時	載荷終了時	1日	40日
CFR1	1.01	1.83	2.23 (0.22)	4.00 (1.19)
CFR2	1.00	3.05	3.43 (0.12)	5.24 (0.72)
CFR3	1.18	4.96	6.08 (0.23)	8.70 (0.75)

(注) ( )内は載荷時たわみに対する増加率

開始時にはCFR1,2スラブでは $0.45\sim 0.49 \times 10^{-4}$ 、CFR3スラブで $0.34\sim 0.46 \times 10^{-4}$ の値となっている。荷重時に生じる中央位置の歪は最大で導入プレストレス時のせいぜい2%弱になるにすぎない。

荷重終了後の経時歪はCFR1,2スラブとCFR3スラブとでは前者はほぼ一定を保っているのに対し、後者は著しく歪が増大し、経過日数39日で $1.48 \times 10^{-4}$ を示している。しかしながらCFR3スラブのこのような場合でも、緊張力導入時の歪の4%程度にすぎない。

CFR1,2スラブではスラブ端部から35cmの位置のPC鋼より線に歪ゲージを貼付けてあるのでその歪の値も示してある。この歪の値は中央部の歪よりも若干小さい値であるが、この位置のPC鋼より線に歪が生じていることはスラブ端部位置のPC鋼より線にも応力が作用していると推測される。一般には、この種の合成床板では設計上、端部のPC鋼より線の効果が無視されるが、これについては改めて検討する必要があるであろう。

### 3.6 鉄筋の経時歪

鉄筋の端部と中央部の歪（経過日数40日迄）を図8に示す。荷重終了時の各スラブの端部の鉄筋歪（引張歪）は平均で、CFR1で $1.06 \times 10^{-4}$ 、CFR2で $2.46 \times 10^{-4}$ 、CFR3で $4.85 \times 10^{-4}$ となっており、荷重レベルの大きさの順に端部鉄筋歪が大きくなっている。同様のことは中央部位置の鉄筋歪（圧縮歪）に対してもいえる。

一方、経過日数40日までの鉄筋歪の増加率〔（経時歪－荷重終了時歪）／荷重終了時歪〕でみると、荷重荷重の大きいスラブ程増加率が小さくなっている。また、荷重時にひびわれが発生したスラブの方が発生しないものよりも増加率が小さい。ちなみに、CFR3スラブの場合、経過日数40日での歪の増加率は端部で5割強、中央部で約1.3倍を示している。クリープ歪のみを考慮した理論（例えば文献[2]）によれば、一体打ち鉄筋コンクリート梁において引張鉄筋歪は経時的にわずかな微増が起きるにすぎない一方で、圧縮鉄筋歪は経時的に数倍まで増大していくといわれているが、本試験体においては圧縮鉄筋歪はこのような傾向を示しているようであるが、引張鉄筋歪については認められないようである。

## 4. 荷重時たわみの解析的検討

ここではtri-linear型のモーメント－曲率関係（以後、M－ $\lambda$ 関係と略す）を用いた荷重－変形解析を行い、荷重終了時のたわみについて検討を行う。

### 4.1 仮定

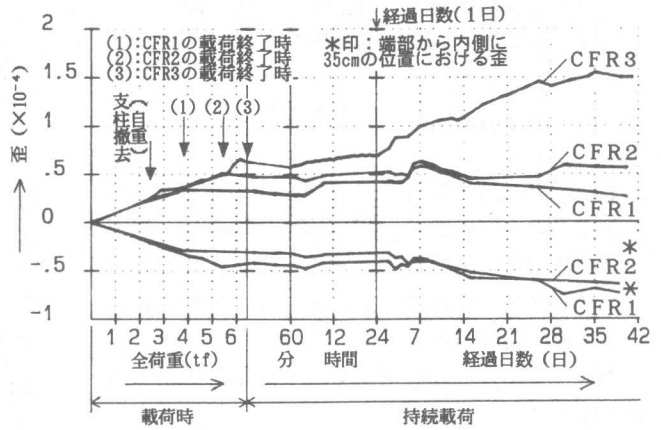


図7 PC鋼より線の経時歪

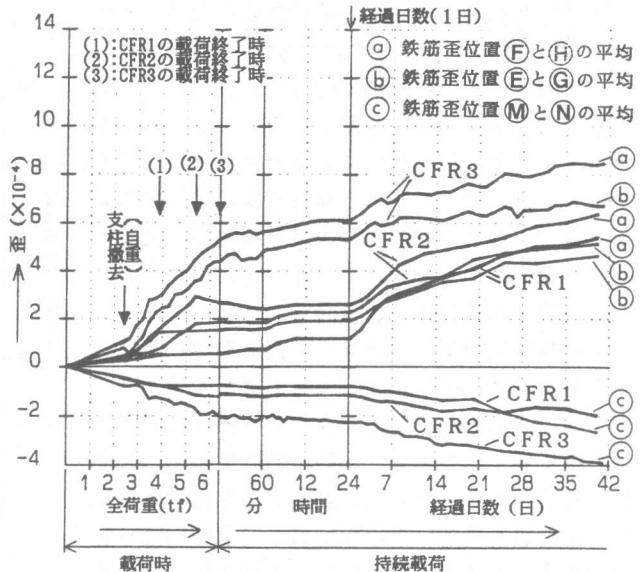


図8 鉄筋の経時歪

①M- $\lambda$ 関係はtri-linear型とする。即ち、ひび割れが発生したならば曲げ剛性を低下させ、更にモーメントが曲げ破壊モーメントあるいは終局曲げモーメントに達したならば塑性ヒンジが形成されたとする。

②ひび割れ分布域の広がりは無視する。

③部材の曲げ剛性は、ACI基準[3]に準じ、端部と中央部の平均曲げ剛性とする。但し、塑性ヒンジが形成されたならば、そのヒンジ点を除き弾性曲げ剛性に復するとする。

④M- $\lambda$ 関係に及ぼすプレストレス等の影響は無視する。

⑤計算は荷重増分で行う。

#### 4.2 解析法の妥当性に関する検討

前述した解析法の仮定の妥当性を小森等が曲げ破壊実験[4]の際に用いた試験体について検討した。解析結果と実験結果の比較を図9に示すが、両者は大略よく対応しており、このことから、プレキャスト板と現場打ちコンクリートからなる合成床スラブに対しても、一体打ち式の現場打ちコンクリート部材に対する解析法を準用して荷重-変形曲線を求めることができると考えられる。

#### 4.3 本試験体での検討

本試験体に対する解析結果と実験結果との比較を図10に示す。但し、比較の為に実験値はスラブ自重による値を除いてある。たわみ実験値はいずれも解析値よりも大きく、解析値は実験値の約55%から68%となった。この理由として本解析ではひび割れ域を考慮していないこと、端部引張り鉄筋の抜出しを考慮していないこと等が考えられる。

### 5 まとめ

経過日数約40日迄の結果をまとめると次のようになる。①荷重時にひびわれを生じた試験体の経時たわみは増加率で見ると、荷重レベルによる差異は見られなかった。②荷重時にひび割れを発生した試験体及び持続荷重下で発生した試験体ともその後の経過においては端部でスラブを貫通するまでに至っていない。③比較的大きな荷重レベルに対してもPC鋼より線の経時歪は緊張力導入時の数%の変化量にすぎない。④FR板コンクリートのクリープ係数及び乾燥収縮歪は現場打ちコンクリートのそれよりかなり低い。

〔謝辞〕 本論文をまとめるにあたって朝富士ビー・エス田中恭哉、村上忠彦両氏及び熊本工業大学建築学科学士鈴木功、永本真両君に深謝します。  
〔参考文献〕

1. 岩原昭次、小森清司、山下正吾：逆丁型PC埋設型枠を用いた合成床スラブの持続荷重下における力学的研究（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.291~pp.292、1992.8
2. 大崎順彦：鉄筋コンクリートのクリープ応力計算法、日本建築学会大会学術講演梗概集、第42号、pp.58~pp.59、1961.2
3. DAN E. BRANSON: Deformation of concrete structures McGraw-Hill, pp.134~pp.136,1977
4. 小森清司、堀信賢、田中恭哉：逆丁形のPC埋設型枠を用いた合成床スラブの載荷実験、日本建築学会九州支部研究報告、第32号、pp.257~pp.260、1991.2
5. 日本建築学会：プレストレスコンクリート設計施工基準・同解説、1987

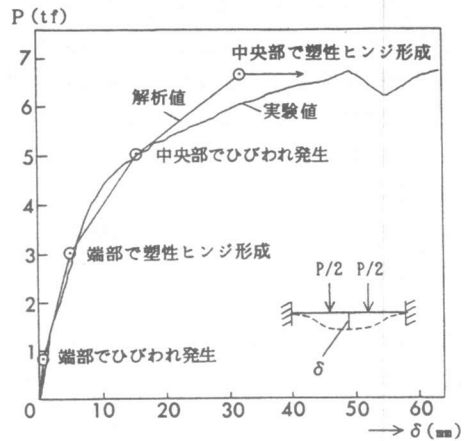


図9 解析法の検討  
(小森等の実験[4]との比較)

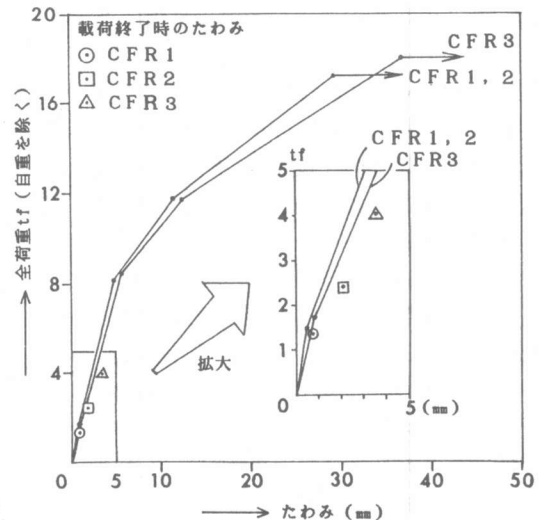


図10 荷重終了時たわみと解析結果との比較